



# ANALYSE FREQUENTIELLE DES DEFAILLANCES D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

Abdelghani Chahmi

## ► To cite this version:

Abdelghani Chahmi. ANALYSE FREQUENTIELLE DES DEFAILLANCES D'UNE MACHINE ASYNCHRONE. JCGE'2014, Jun 2014, st-louis, France. hal-01378032

**HAL Id: hal-01378032**

**<https://hal.science/hal-01378032>**

Submitted on 10 Oct 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ANALYSE FREQUENTIELLE DES DEFAILLANCES D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

Abdelghani CHAHMI

Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble G2ELab, Université de Grenoble

Bat Ense3 BP46 F-38402 SMH Cedex, Grenoble, France

Abdelghani.Chahmi@g2elab.grenoble-inp.fr

**RESUME-** Cet article traite de la détection et localisation de défauts dans les entraînements électriques et en particulier ceux à base de machine asynchrone. D'une part, on démontre la caractérisation des processus de défaillance, la définition de symptômes pertinents et l'obtention de modèles de ces dysfonctionnements, et d'autre part le développement de diagnostics de la machine. Nous présenterons le contexte de cette étude en rappelant les défauts qui peuvent intervenir dans un ensemble électrique tournant et un bref état de l'art de la recherche en détection et localisation des défauts. Les études de dysfonctionnement dans les entraînements ne pouvant faire appel qu'à peu de données expérimentales, il a été indispensable de nous munir d'outils de simulation qui nous ont servi à caractériser les comportements défaillants. La détection de défauts fait appel aux techniques de traitement du signal dans les phases de fonctionnement connues (vitesse fixe), mettre en évidence et localiser un dysfonctionnement.

**ABSTRACT-** This article examines the detection and localization of faults in electrical systems, particularly those using asynchronous machines. First, the process of failure will be characterized, relevant symptoms will be defined and based on those processes and symptoms, a model of those malfunctions will be obtained. Second, the development of diagnosis of the machine will be shown. We will present the context of this study, keeping the faults which might occur in a rotating electrical body in mind, and a brief state of the art of the research in detection and localization of faults. As studies of malfunctions in electrical systems could only rely on a small amount of experimental data, it has been essential to provide ourselves with simulation tools which allowed us to characterize the faulty behavior. Fault detection uses signal processing techniques in known operating phases (fixed speed), considering and locating malfunctions.

**MOTS-CLES-** Moteur asynchrone, Modélisation, Défaut rotorique, Défaut statorique, Analyse fréquentielle, Traitement du signal, Caractérisation des défauts.

## 1. Introduction

Nous allons situer cette étude parmi les travaux existants, elle s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés depuis une dizaine d'années au sein du laboratoire sur la thématique de la sûreté de fonctionnement des entraînements électriques. Pour cela, il faut d'abord préciser dans une première partie le contexte de l'étude et pourquoi la détection et la localisation de défauts dans un système électrique constitue un domaine d'étude émergent et prioritaire.

La deuxième partie de ce travail présente un outil de validation qui consiste à l'utilisation de simulation afin d'apporter la connaissance requise sur le fonctionnement du système sain et défaillant. Nous détaillerons donc tous d'abord la machine asynchrone en mettant l'accent sur les hypothèses faites et leur validité en fonctionnement défaillant. Enfin, nous présentons la troisième partie. Ceci nous amène au principe de la méthode d'analyse de signal qui repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant à surveiller. La définition des caractéristiques principales des défaillances est analysée en termes de modification spectrale (apparition, déplacement de raies) afin de proposer les méthodes de détection les plus adaptées à la mise en évidence des phénomènes c'est-à-dire la détection d'une ou plusieurs fréquences caractéristiques du dysfonctionnement.

## 2. Contexte de l'étude

Dans de nombreux secteurs industriels, la sûreté de fonctionnement est un enjeu pour assurer une compétitivité optimale de l'outil de production. Les machines électriques sont très présentes dans de nombreux processus et leur surveillance est devenue un souci permanent, particulièrement dans la machine asynchrone. Aujourd'hui, les chaînes de production sont dotées des systèmes de protection fiable, car une quelconque

défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celle-ci a pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particuliers du système.

Les systèmes électriques tiennent une place de plus en plus importante dans les dispositifs industriels : équipement de production d'énergie, traction électrique (ferroviaire, urbaine et maritime), réseaux électrique industriels, Ils sont complexes et critiques en termes de sécurité et de continuité de services. La croissance de ce type de machine électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, sont faible cout d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien.

## 2.1 La détection et localisation de défauts

Nous allons dresser une liste des principaux défauts pouvant se produire dans une machine asynchrone. Nous distinguons trois parties [1,2] :

- La machine
- Le convertisseur
- La mécanique

L'étude des défauts peut être menée suivant différentes approches selon l'angle sous lequel on se place. Lorsque le système est déjà mis en place, il est plus adéquat de prévoir des outils de détection ou de localisation permettant de déceler un début de défaillance dans un temps raisonnable pour pouvoir y remédier. Une autre approche consisterait à prévoir et à dimensionner le système pour réduire le taux de pannes à un niveau le plus bas possible soit par la conception d'architectures tolérantes aux défauts. L'autre approche consisterait en une modélisation des systèmes en particulier les machines électriques, en présence d'un défaut afin de prédire le plus fidèlement possible son comportement dès l'apparition d'un défaut.

Une autre approche consiste à rechercher dans les signaux mesurés les symptômes du défaut : ce sont les méthodes reposant sur une approche signal. Elles peuvent reprendre en grande partie des informations issues de l'expérience. Durant ces dernières années, l'avancement des outils de calcul et le développement des modèles (pour la simulation numérique) sont apparues. C'est pour cette raison une méthode d'analyse fréquentielle a été proposée, l'idée clé dans cette méthode est de transformer le courant du moteur en une représentation fréquentielle pour capturer les variations des composantes du signal. Certains types de défaut peuvent même avoir une signature caractéristique dans le spectre qui peut être utilisée dans l'analyse des signaux. Les modèles analytiques ne représentent pas la totalité des phénomènes physiques mis en jeu.

## 2-2 hypothèses de la modélisation

La machine asynchrone est un système bien connu [5] ; des modèles existent et permettent, dans la majeure partie des cas et sous certaines hypothèses simplificatrices, une représentation de la machine sans défaut. Ces hypothèses sont les suivantes [1,6] :

- L'entrefer est de largeur constante sans effet d'encoche (pas d'excentricité, de balourd, réduction du nombre d'harmoniques dans le développement des inductances)
- Assimilation de la cage à un court-circuit ayant le même nombre de phases que le bobinage statorique (simplification des équations de la machine par la prise en compte de l'effet moyen de la cage)
- Répartition sinusoïdale, le long de l'entrefer, des champs magnétiques de chaque bobinage (simplification des équations de la machine par la prise en compte des expressions en complexe des courants, génération d'un modèle vectoriel)
- Absence de saturation dans le circuit magnétique (comportement identique de chaque phase, utilisation d'un modèle vectoriel)
- Les influences de l'effet de peau et des échauffements des conducteurs sont négligées (pas de variation des paramètres intervenant dans la machine)
- Couplage en étoile des bobinages (les courants forment un système équilibré)

## 2.3 Equations de base de la machine asynchrone

Sous les conditions rappelées au paragraphe précédent, les équations des circuits électriques font intervenir des inductances propres et mutuelles permettant de définir les flux en fonction des courants [1,7].

Au niveau du stator, les tensions vérifient :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Où la matrice des résistances s'écrit d'après l'hypothèse de symétrie :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

Au niveau du rotor, sous l'hypothèse que le rotor est assimilable à un rotor avec enroulement triphasés, les tensions s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = [R_R] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

La matrice  $R_R$  possède la même forme que  $R_s$

Les flux s'expriment alors grâce aux matrices inductances et aux courants

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{SR}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = [M_{RS}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [L_R] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Afin de pouvoir rendre compte des interactions entre les phases, nous avons exprimé chaque matrice résistance et inductance en fonction du nombre de spires des enroulements de la machine. Ce modèle permet en particulier de créer des défauts asymétriques que ce soit au stator ou au rotor par la variation du nombre de spires de l'enroulement de la phase en défaut. Le défaut peut être localisé sur une ou plusieurs phases.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} n_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & n_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & n_{sc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[R_R] = \begin{bmatrix} R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} n_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & n_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & n_{rc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$n_{sa}$  correspond au nombre de spire de la phase a du stator.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{sab} & M_{sca} \\ M_{sab} & L_{sb} & M_{sbc} \\ M_{sca} & M_{sbc} & L_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{sa}^2 l_s & n_{sa} n_{sb} m_s & n_{sa} n_{sc} m_s \\ n_{sa} n_{sb} m_s & n_{sb}^2 l_s & n_{sb} n_{sc} m_s \\ n_{sa} n_{sc} m_s & n_{sb} n_{sc} m_s & n_{sc}^2 l_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[L_R] = \begin{bmatrix} L_{ra} & M_{rab} & M_{rca} \\ M_{rab} & L_{rb} & M_{rbc} \\ M_{rca} & M_{rbc} & L_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{ra}^2 l_r & n_{ra} n_{rb} m_r & n_{ra} n_{rc} m_r \\ n_{ra} n_{rb} m_r & n_{rb}^2 l_r & n_{rb} n_{rc} m_r \\ n_{ra} n_{rc} m_r & n_{rb} n_{rc} m_r & n_{rc}^2 l_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[M_{SR}(\theta)] = \begin{bmatrix} n_{sa} n_{ra} m_{sr} \cos(\theta) & n_{sa} n_{rb} m_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & n_{sa} n_{rc} m_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ n_{sb} n_{ra} m_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & n_{sb} n_{rb} m_{sr} \cos(\theta) & n_{sb} n_{rc} m_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ n_{sc} n_{ra} m_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & n_{sc} n_{rb} m_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & n_{sc} n_{rc} m_{sr} \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[M_{SR}(\theta)] = [(M_{RS}(\theta))]^T$$

### 2.3.1 Les modèles des défauts dans la machine

Il faut noter que cette modélisation est critiquable :

- les défauts de type court-circuit sont représentés dans le modèle comme des suppressions de spires c'est-à-dire des ouvertures partielles de phase ; cela ne correspond pas tout à fait à la réalité puisqu'il faudrait aussi tenir compte des spires en court-circuit. Ce modèle constitue un progrès par rapport aux modèles équilibrés ou/et ne considérant qu'une variation de résistance couramment utilisés pour valider les algorithmes [2].

## 3. Approche signal

La connaissance des défaillances potentielles de l'entraînement et les études bibliographiques réalisées ont montré l'intérêt de l'analyse des signaux pour la caractérisation des défauts dans les machines tournantes. Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé à surveiller.

### 3.1 Choix de la variable à étudier

L'objectif de cette approche consiste à déterminer les signaux accessibles les plus significatifs pour la détection et la localisation de défauts. Pour cela, il est nécessaire de tenir compte d'une part de la bande passante du système bouclé et d'autre part du contenu spectral du défaut à surveiller [2,8].

### 3.2 De l'influence des boucles de contrôle

Il ne faut pas perdre de vue que le système comporte des boucles de contrôle des courants (pour assurer le contrôle vectoriel) et de la vitesse [8]. Ces correcteurs ont pour fonction d'assurer la conformité entre la consigne (ref) et la mesure (y) en agissant sur la grandeur de commande (u). Intuitivement, il est évident que la commande cherchera à compenser toute variation de la grandeur mesurées disponibles pour la détection et la localisation des défauts (les deux courants mesurés et la vitesse mesurée, le vecteur tension de commande en sortie du dispositif de contrôle vectoriel et la référence de couple en sortie de l'asservissement de vitesse).

Considérons le schéma bloc suivant représentant de manière simplifiée la partie contrôle du couple d'un entraînement électrique similaire à notre application.

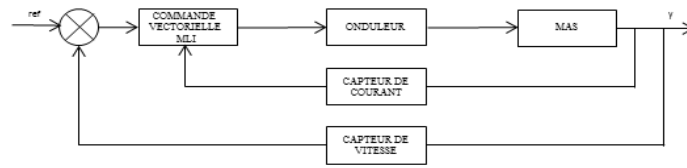


Figure 1 :SchémaBloc du Système Simplifié

### 3.3 Caractérisation fréquentielle des défauts

Le but de la caractérisation fréquentielle des défauts consiste, en fonction du défaut considéré, à déterminer la (ou les) fréquences(s) liées(s) au défaut et à discriminer la variable (mesurée ou calculée) la plus pertinente dans laquelle cette fréquence peut être isolée.

#### 3.3.1 Fonctionnement du moteur sain

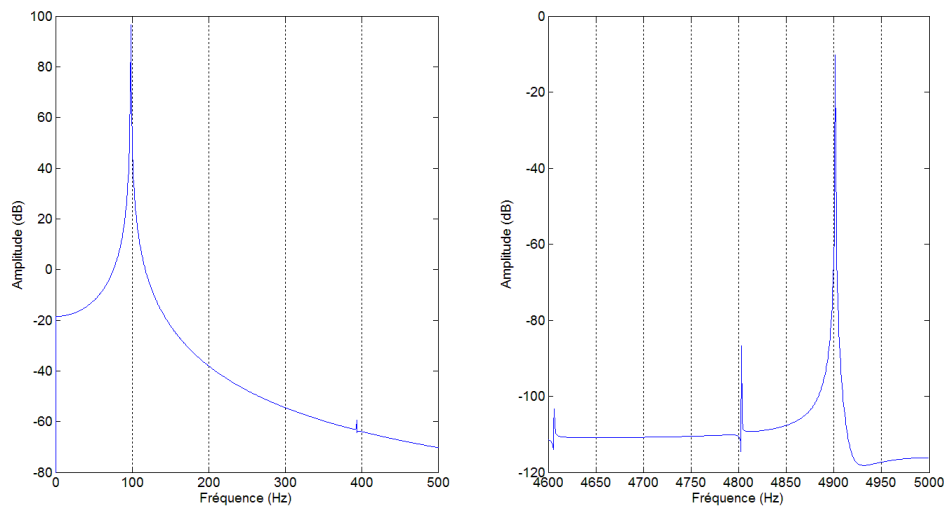


Figure2 : Spectre du courant statorique de la phase a en BF et HF

La figure 2montre le spectre du courant statorique ( $I_{sa}$ ) de la phase a de la machine asynchrone sans court-circuit.En basse fréquence, on note la présence de la fréquence fondamentale ( $f_e$ ). En haute fréquence, on note la présence de la fréquence  $f_{MLI}-f_e$  et  $f_{MLI}+2f_e$ .

#### 3.3.2 Fonctionnement du moteur avec défaut au stator sur une phase

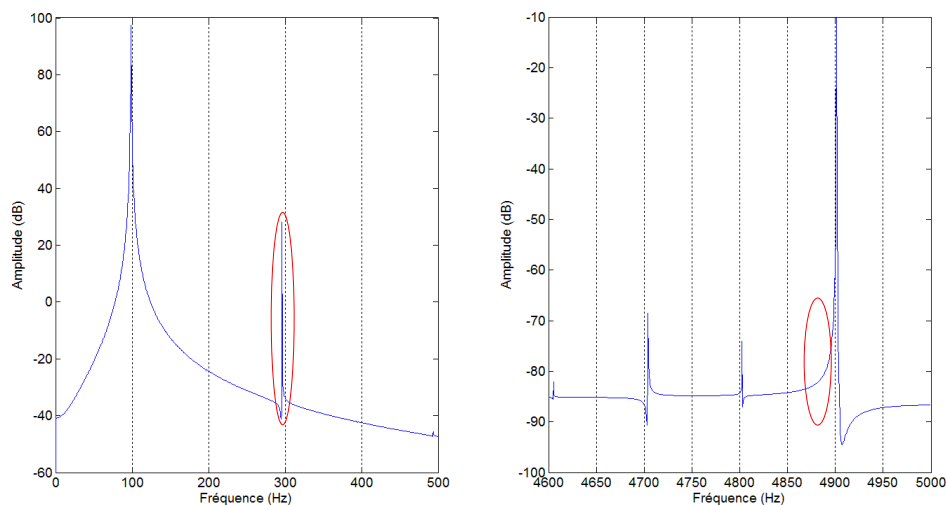
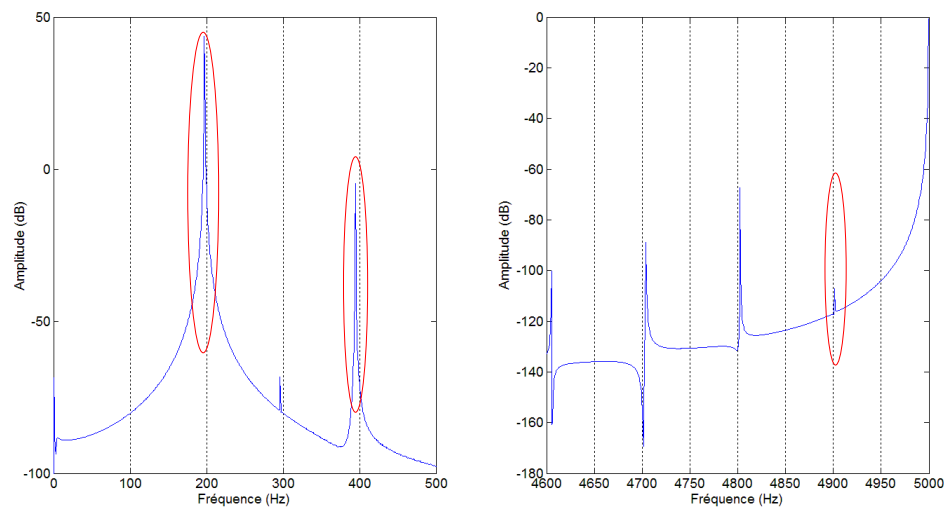


Figure 3 : Spectre du courantstatorique de la machine avec défaut sur une phase au stator en BF et HF

La figure 3 montre le spectre du courant statorique ( $I_{sa}$ ) de la machine asynchrone avec court-circuit sur une phase. En basse fréquence, on note l'apparition de la fréquence du défaut ( $3f_e$ ). En haute fréquence, on note la présence de la fréquence  $f_{MLI}-f_e$  et  $f_{MLI}-3f_e$ .

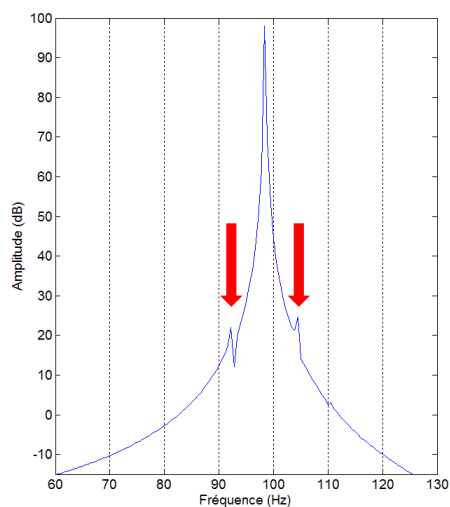


**Figure 4 : Spectre du courant statorique de la machine en défaut sur une phase au stator dans le référentiel (d,q)**

La figure 4 illustre en basse fréquence la fréquence du défaut ( $2f_e$ ) et en haute fréquence on note la présence de la fréquence  $f_{MLI}-2f_e$ . Le tableau ci-dessous résume les résultats de simulation de la machine avec défaut sur une phase au stator.

Tableau 1. Fréquences du défaut sur une phase au stator		
	BF	HF
Courant ( $I_{sa}$ )	$3f_e$	$f_{MLI}-3f_e$
Référentiel (d,q)	$2f_e$	$f_{MLI}-2f_e$

### 3.3.3 Fonctionnement du moteur avec défaut au rotor sur une phase



**Figure 5 : Défaut sur une phase au rotor**

La figure 5 présente les fréquences qui caractérisent le défaut par l'apparition de deux fréquences autour de la fréquence électrique  $f_{\text{électrique}}(1 \pm 2g)$  ou  $g$  représente le glissement. Remarquons que ce défaut sera très difficile à détecter dans le spectre du courant car l'amplitude de la raie à la fréquence fondamentale est très importante par rapport à celle de la raie recherchée. L'amplitude de défaut considéré consiste en une suppression de 30% du bobinage d'une phase au rotor ou stator.

### 3.4 Défaut onduleur

La figure 6 illustre le spectre du courant ( $I_{sa}$ ) de la machine saine avec défaut d'onduleur (composant ouvert) et la machine saine, on notant l'apparition des raies autour de la fréquence électrique  $f_e$  et la fréquence  $f_{MLI} - f_e$ .

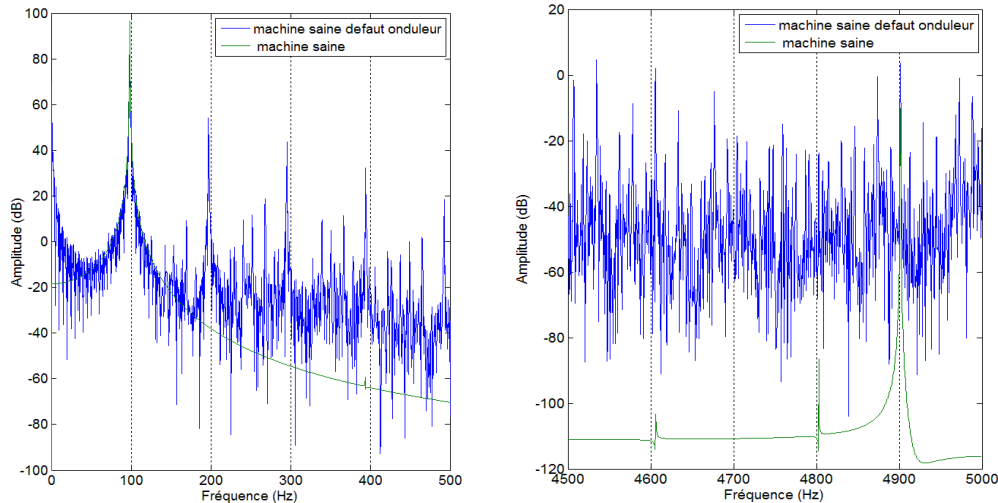


Figure 6 : Spectre du courant de la machine saine avec défaut onduleur et la machine saine en BF et HF

### 3.5 Défauts capteurs

Le défaut capteur considéré consiste en un offset sur la grandeur mesurée (50A soit environ 15% du calibre).

#### 3.5.1 Défaut capteur de courant

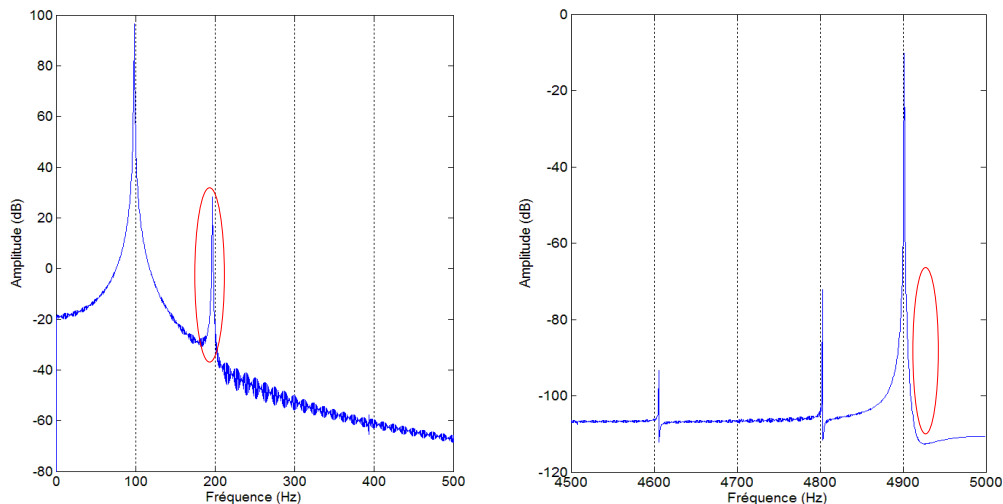
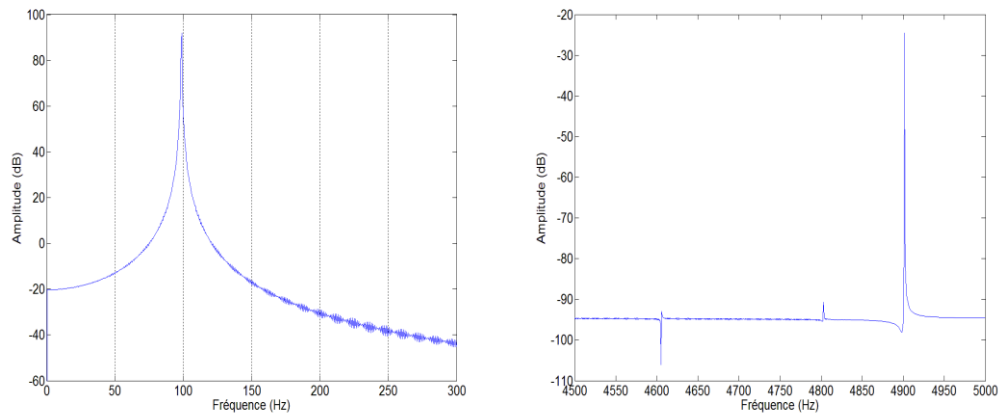


Figure 7 : Spectre du courant de la phase a de la machine avec défaut sur le capteur de courant en BF et HF

La figure 7 présente le spectre du courant ( $I_{sa}$ ) de la phase a de la machine lorsque le capteur est défaillant, on retrouve la fréquence de défaut  $2f_e$  en basse fréquence et  $f_{MLI} - f_e$ ,  $f_{MLI} - 2f_e$  en haute fréquence.

#### 3.5.2 Défaut capteur de vitesse

Nous présentons ce type de défaut pour insister sur l'importance de le détecter, la figure 8 présente le spectre de la vitesse pour une erreur de 5 Rad/s (soit 2,5% de la valeur de référence)

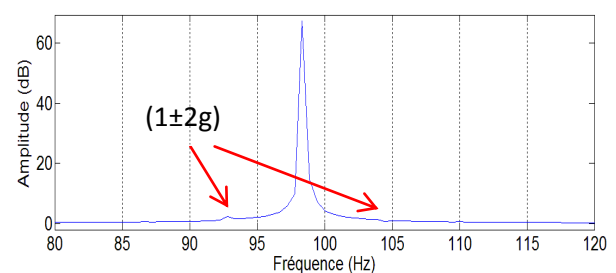
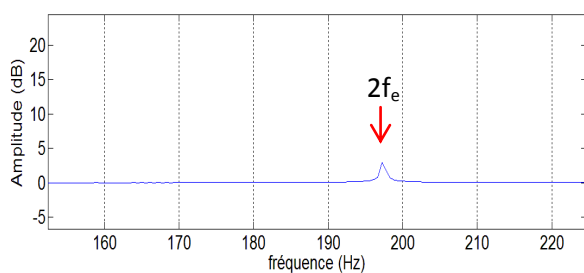
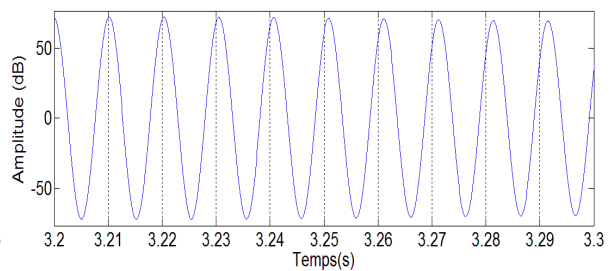
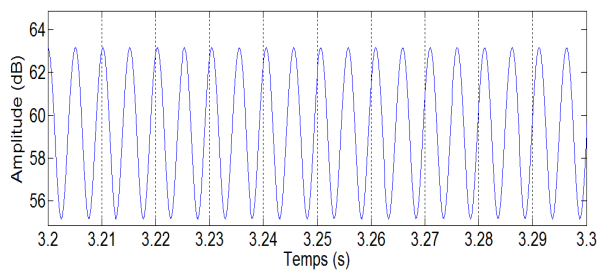


**Figure 8 : Spectre du courant de la phase a de la machine avec défaut sur le capteur de vitesse en BF et HF**

Nous présentons ce type de défaut pour insister sur l'importance de le détecter mais comme les variables concernées sont continues, il n'existe pas, à notre connaissance, de fréquence caractéristique pour ce défaut. Il faut donc suivre une autre grandeur ou reconstruire la vitesse pour le comparer avec la vitesse mesurée.

### 3.6 Détection des défauts par la Méthode de Transformation Rapide (FFT)

Il est aussi possible d'utiliser la méthode FFT pour détecter les défauts dans les grandeurs de commande sur le stator (défaut produit sur une phase), rotor (défaut produit sur une phase), onduleur et sur le capteur de courant.



**Figure 9 : Défaut produit sur une phase au stator**

**Figure 10 : Défaut produit sur une phase au rotor**



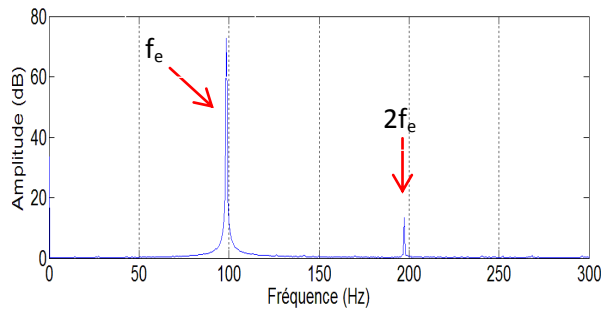
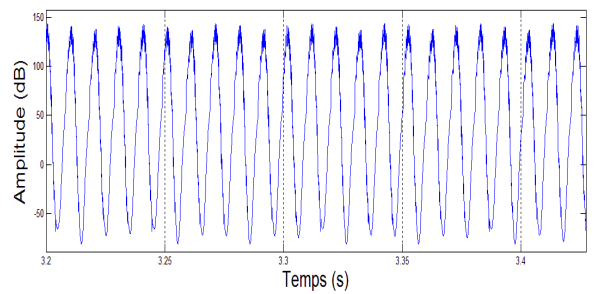


Figure 11 : Défaut d'onduleur de la machine saine

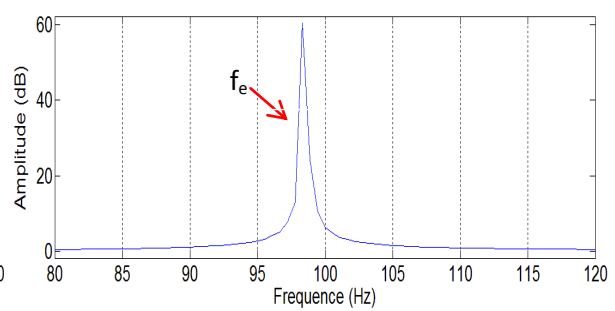
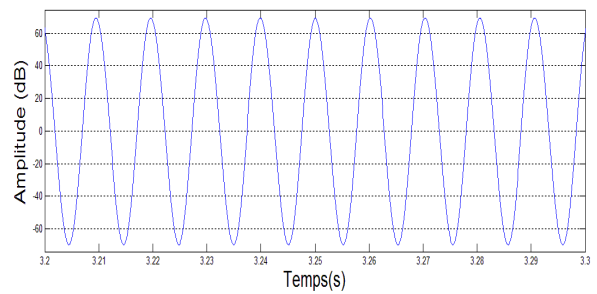


Figure 12 : Défaut sur le capteur de courant

## 4. Conclusion

La majorité des recherches récentes était orientée vers la surveillance de l'état d'une machine asynchrone en utilisant le courant statorique (son spectre) comme variable permettant la détection et le diagnostic de certains défauts. Ce travail a porté sur la simulation d'un entraînement électrique à base de machine asynchrone. Après avoir montré, dans le contexte de l'étude, l'inadaptation des méthodes classiques de maintenance et de diagnostic, nous nous sommes attachés à exploiter au mieux les informations disponibles sur l'application. Ces informations tout d'abord sous forme de connaissance, ont permis d'établir des modèles de simulation. Nous avons souligné l'influence du contrôle sur le choix de la variable à considérer pour détecter la signature fréquentielle caractéristique du défaut, nous avons présenté les caractéristiques fréquentielles des défauts concernant notre application. Elles sont résumées dans le tableau suivant.

A partir du courant de phase  $I_{sa}$  :

Tableau 2 : Caractéristiques de l'ensemble				
	Stator	Rotor	Onduleur	Capteur courant
$f_{MLI}-3f_e$	X		X	
$f_{MLI}-2f_e$			X	X
$3f_e$	X		X	
$2f_e$			X	X
$f_e$			X	X

A partir des sorties de la commande vectorielle

$2f_e$	X		X	
$f_e$			X	X

## Références

- [1] Trajin, Regnier.J, Faucher.J Bearing “Fault indicator in induction machine using stator current spectral analysis” Power Electronics, machine and drives, 2008. PEMD. 4th IET Conférence On.
- [2] AndrianCeban “ Méthode globale de diagnostic des machines électriques” Thèse de doctorat, université Lille de nord de France, 2012.
- [3] Mohamed el kamel.O “ Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée” Thèse de doctorat, université de lorraine, 2012.
- [4] S.Diao, Z.Makni,J-F.Bisson “Sensor Fault Diagnosis for Improving the Availability of Electrical Drives” Industrial Electronics Society, IECON2013-39th Annual Conference of the IEEE.
- [5] I.BenAmeurBazine“ Identification en boucle fermé de la machine asynchrone : Application à la détection de défaut ” Thèse de doctorat, Université de Poitiers et de L’université de Tunis EL MANAR, 2008.
- [6]SannaJelassi “ Impact d’un court-circuit interne au stator d’une machine asynchrone sur les phénomènes générés par la denture” Thèse de doctorat, Université d’Artois et de L’université de Monastir, 2011.
- [7] Xu Boqiang, Zhou Huihuan,SunLiling “ weak-signal detection and the application in detection of electrical motors faults” Electrical Machines and Systems. ICEMS, International Conference On, 2007.
- [8]Vincent Devanneaux“Modélisation des machines asynchrone triphasées à cage d’écureuil en vue de la surveillance et du diagnostic” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2002.